

Evaluation of Crop Growth and Soil Chemical Properties in Cadmium Contaminated Soil Using Biochar Derived from Rendered Animal Carcass Residues

Jin Ju Yun¹, Dong-Won Lee², Jae-Hong Shim³, Sang-Ho Jeon³, Yun-Hae Lee⁴, Soon-Ik Kwon⁴, Jong-Hwan Park⁵, Se-won Kang⁶, Ju Sik Cho^{6*}, and Seong-Heon Kim^{3*}

¹Postdoctoral Associates, Soil and Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

²Assistant Researcher, Soil and Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

³Researcher, Soil and Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

⁴Senior Researcher, Soil and Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

⁵Professor, Department of Life Resource Industry, Dong-A University, Busan 49315, Korea

⁶Professor, Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

*Corresponding author: Seong-Heon Kim, ksh4054@korea.kr

*Co-corresponding author: Ju Sik Cho, chojs@suncheon.ac.kr

ABSTRACT

Received: November 2, 2023

Revised: November 22, 2023

Accepted: November 30, 2023

Edited by

Kwon-Rae Kim,
Gyeongsang National University,
Korea

ORCID

Jin Ju Yun
<https://orcid.org/0000-0002-5433-7325>

Se-won Kang
<https://orcid.org/0000-0003-2038-5465>

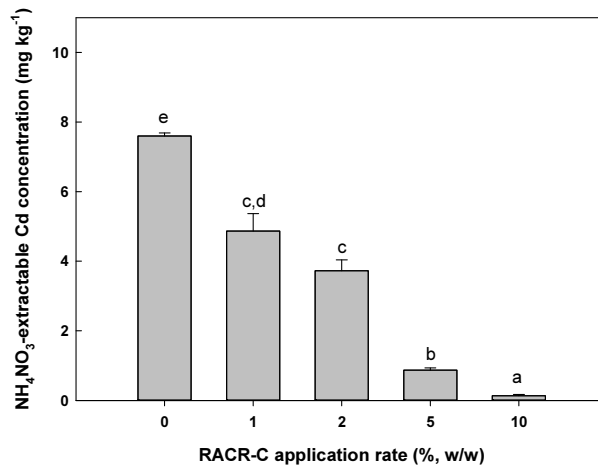
Ju Sik Cho
<https://orcid.org/0000-0001-9610-5373>

Seong-Heon Kim
<https://orcid.org/0000-0001-6047-9103>

Rendering process is known as a quick and stable method that copes with dead livestock by extracting and purifying the animal's fat and others through the heat treatment at high temperature and with high pressure. However, a large amount of solid byproducts equivalent to 15% of the weight of carcasses after this process are discharged, and some of them are provided as livestock feed and compost, but others are landfilled since the processed byproducts must go through the secondary process again. It is judge that RACR (rendering animal carcass residue) has a high utilization value since it is composed of protein and bone tissues and a very high domestic applicability as it can secure a rich amount of it. Therefore, in this study, the effects of biochar derived from rendered animal carcass residues were evaluation on crop growth characteristics and soil chemical properties in cadmium contaminated soil. The results of pot experiment showed the process with RACR-C (rendering animal carcass residue biochar) had the effect of soil amendment that increased the pH, organic content, available phosphate, and cation exchange capacity in the contaminated soil. In addition, the analysis of phyto-availability of cadmium by 1 M NH₄NO₃ sampling method showed there was an effect of reducing cadmium transfer by 26 to 98% depending on the amount of processed biochar compared to the untreated control plot and also effective in promoting the growth of radish, such as fresh weight, leaf number. Thus, it is judged that the biochar produced with the rendering animal carcass residue biochar can be applicable as a soil stabilizer during the process of cadmium-contaminated soil, and eco-friendly and economically efficient in terms of waste resource recycling.

Keywords: Biochar, Cadmium contaminated soil, Crop growth, Rendering animal carcass residue, Soil chemical property





Phytoavailability of Cd by 1 M NH₄NO₃ extraction in soil after plant harvest.

Introduction

토양 중금속오염의 발생 원인은 휴·폐광산에 의한 중금속 유입, 과도한 농약 사용, 농업폐기물로 인한 토양오염 등 매우 다양하다 (Hong et al., 2021). 다양한 경로를 통해 토양으로 유입된 카드뮴은 토양 내 이동성이 높아 식물의 뿌리를 통해 쉽게 식물체 내로 흡수되고 (John et al., 1972; Baker et al., 1994), 용탈수에 의해 지하수로 유입되어 환경적으로도 많은 문제를 유발한다 (Cai and Ma, 2003). 또한 여러 경로를 통해 인간에게 전이·축적되어 건강에 심각한 위협이 되고 있어 카드뮴오염토양에 대한 복원 대책마련이 필요하다. 일반적으로 오염된 토양은 인위적으로 물리·화학적 혹은 생물학적 처리를 통해 복원한다. 우리나라에서는 토양의 오염을 정화하기 위해 굴착 (excavation), 매립 (landfill), 토양 세척법 (soil washing), 동전기법 (electrokinetic separation) 등과 같은 물리·화학적 방법이 사용되어왔다 (Kumpiene et al., 2008; Lim et al., 2013) 그러나 기존의 이러한 방법들은 비용이 많이 소모되고 대부분 처리 과정이 복잡할 뿐만 아니라 토양 중 카드뮴의 농도 저감에만 목적을 두고 있어 정화 후 토양 자체가 지닌 고유의 물리적, 화학적, 생물학적 기능을 상실하여 토양의 재사용이 어렵다 (Ok et al., 2011; Almaroai et al., 2012; Gu et al., 2017). 이에 최근에는 토양을 굴착하지 않고 원위치 (in situ)에서 토양개량제를 처리하여 토양 내 오염물질을 안정화시키고, 2차 오염을 방지하는 안정화 (stabilization) 방법이 경제적이고 친환경적인 방법으로 주목받고 있다 (Jang et al., 2010; Kim et al., 2010). 안정화 방법은 토양 환경 내에서 오염물질의 회수가 이루어지지 않는지만 생물 유효도 (bio availability)를 저감시키는 것으로 이동성과 용출이 쉬운 형태로 변화시켜 중금속의 유해성을 저감시킨다 (Kim et al., 2010; Ok et al., 2011; El-Azeem et al., 2013). 토양개량제는 토양에 처리 시 토양의 pH, 보수력, 양분보유능력, 통기성, 미생물 활성 등의 물리·화학적 및 생물학적 특성 개량을 목적으로 사용된다. 토양개량제는 원료의 특성에 따라 농업 부산물, 퇴비, 이탄, 수피, 슬러지 등과 같은 유기성 토양개량제와 펠라이트, 버미큘라이트, 암면, 석회 등과 같은 무기성 토양개량제로 구분된다. 그리고 최근에는 폐자원을 열분해하여 제조한 바이오차 (biochar)를 토양개량제로 활용한 중금속의 안정화 연구가 활발히 진행되고 있다 (Ahmad et al., 2014a, 2014b; Mohan et al., 2014).

바이오차는 산소 (O₂)가 제한된 혐기조건에서 700°C 이하의 온도로 바이오매스 (biomass)를 열분해 하여 얻은 고형물로 탄소 (C)의 함량이 높은 것으로 알려져 있다 (Lehmann, 2007; Lim et al., 2014). 또한 넓은 표면적과 산소 함유 관능기 (oxygen functional groups)를 보유하고 있기 때문에 환경 내에서 중금속을 효과적으로 흡착할 수 있으며

(Lee, 2004; Li et al., 2017), 높은 알칼리성 무기물의 축적과 탈수소화 반응으로 인해 높은 pH를 나타낸다 (Zheng et al., 2012). 그로 인해 토양의 pH를 상승시키고 토양의 음전하 증가에 따른 양이온성 중금속의 흡착이나 수산화물 침전을 통해 중금속의 이동성을 감소시킬 수 있다 (Zhao and Masaihiko, 2007; Ok et al., 2010). 또한 참깨, 콩, 땅콩 줄기 등과 같은 농업 부산물 (Ahmad et al., 2012; Kang et al., 2016), 계분, 우분과 같은 축산 부산물 (Uchimiya et al., 2010; Zhang et al., 2021), 하수슬러지와 같은 유기성 부산물 (Khan et al., 2013) 등 기존에 재활용률이 낮은 폐기물들을 사용하기 때문에 저렴하고, 생산비용 저감 뿐만 아니라 폐기물을 자원화할 수 있다는 장점도 가지고 있다 (Sun et al., 2013).

랜더링 (rendering) 처리는 가축사체를 고온고압의 열처리 과정을 통해 가축의 지방 등을 용출·정제 시키는 방법으로 매몰 시 발생하는 침출수 누수로 인한 주변 토양, 지하수 및 하천오염 등의 문제점들에 대응할 수 있는 신속하고 안정적인 처리 방법으로 알려져 있다 (Seo et al., 2012). 그러나 랜더링 처리 후 가축사체 중량의 15%에 해당하는 많은 양의 고형부산물이 배출되는데 (Park et al., 2021a), 일부 가축사료와 퇴비로 제공하고 있으나 처리한 부산물은 다시 2차과정을 거쳐 만들어져야 하는 어려움이 있어 대부분 매립하고 있다 (Seo et al., 2011). 랜더링 가축사체 부산물 (rendering animal carcass residue, RACR)은 단백질과 뼈로 구성되어 있어 활용가치가 매우 높으며 풍부한 양을 확보할 수 있어 국내 적용성이 매우 높을 것으로 판단된다. 하지만 국내에서 랜더링 가축사체 부산물을 재활용하기 위한 관련성 있는 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 랜더링 가축사체 부산물을 이용하여 바이오차를 제조하고 카드뮴 오염토양 복원에 사용되는 안정화제로써 그 가능성을 평가하기 위해 실제 오염 토양에 처리한 후 작물의 생육 특성과 토양 화학성에 미치는 영향을 분석하였다.

Materials and Methods

공시재료 랜더링 가축사체 부산물 (rendering animal carcass residue, RACR)은 충청남도 천안시 수신면에 위치한 랜더링 처리업체인 형제산업(주)으로부터 제공받아 사용하였으며, 보관 기간 중에 흡수된 수분 제거를 위해 80°C에서 하루 정도 건조 시킨 후 사용하였다. 건조된 RACR는 어닐링 박스 (annealing box)에 넣고 질소 가스를 주입하여 산소 유입을 차단한 후 5°C min⁻¹의 승온 조건에서 500°C까지 도달시켜 2시간동안 열분해 장치 (B400, Nabertherm GmbH, Germany)에서 열분해를 실시하였다. 이후 내부에서 12시간 방냉 한 후 생산된 바이오차 (rendering animal carcass residue biochar, RACR-C)를 시료로 사용하였다. 실험에 사용된 바이오차의 물리 화학적 특성은 Table 1에서 보는 바와 같다.

Table 1. Physicochemical properties of rendering animal carcass residue biochar (RACR-C).

Yield (%)	Bulk density (g cm ⁻³)	Particle density (g cm ⁻³)	Surface area (m ² kg ⁻¹)	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	C (%)	H (%)	N (%)	H/C (%)	T-P (%)			
5.6 ± 0.42	0.736 ± 0.26	1.848 ± 0.55	99.1 ± 2.95	9.5 ± 0.5	22.9 ± 1.47	28.6 ± 0.16	0.4 ± 0.08	2.7 ± 0.07	0.17	9.12 ± 0.93			
Exch. cations (cmol _c kg ⁻¹)				Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Ni (mg kg ⁻¹)	As (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	Hg (mg kg ⁻¹)
K	Ca	Mg	CEC										
16.0 ± 1.63	3.2 ± 0.73	1.9 ± 0.82	29.2 ± 0.99	1,121 ± 8.15	72.1 ± 2.93	61.7 ± 3.84	95.3 ± 2.71	0.015 ± 0.004	ND	2.21 ± 0.64	ND	ND	ND

공시토양 실험을 위해 전라남도 순천 지역에 소재하는 폐광산 인근에서 오염 토양을 채취하였으며 이를 공시토양으로 선정하였다. 공시 토양은 표토 (0 - 30 cm)를 채취하여 풍건 (air drying)한 후 작물재배실험에 사용하였으며, 2 mm 이하로 체거름 하여 기본 특성 분석에 사용하였다. 토양의 화학적 특성은 Table 2와 같이 pH는 5.2로 약산성이었으며, 유기물 (organic matter) 함량은 22.9 g kg^{-1} , 유효인산 (Avail. P_2O_5) 함량은 67 mg kg^{-1} 으로 나타났다. 공시토양 내의 중금속 함량은 카드뮴이 22.2 mg kg^{-1} 으로 우려기준 (concern standard) 4 mg kg^{-1} 과 대책기준 (countermeasure standard)인 12 mg kg^{-1} 을 초과하는 것으로 나타났다.

Table 2. Chemical properties of experimental raw soil used in the study.

pH (1:5)	EC (dS m^{-1})	O.M (g kg^{-1})	T-N (g kg^{-1})	Avail. P_2O_5 (mg kg^{-1})	Exch. cations ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)				
					K	Ca	Mg	CEC	
5.2 ± 0.05	0.2 ± 0.08	22.9 ± 1.53	2.7 ± 0.33	67 ± 4.99	0.4 ± 0.19	2.0 ± 0.11	0.5 ± 0.01	5.6 ± 0.42	
As (mg kg^{-1})		Cd (mg kg^{-1})		Cu (mg kg^{-1})		Ni (mg kg^{-1})		Pb (mg kg^{-1})	
9.4 ± 0.18		22.2 ± 2.16		106.2 ± 5.33		74.8 ± 4.12		195.0 ± 9.35	
								Zn (mg kg^{-1})	
								190.1 ± 7.79	

포트실험 RACR-C처리에 의한 토양 내 카드뮴의 안정화 효율과 토양의 화학적 특성 변화를 평가하기 위해 순천대학교 내 유리온실에서 열무 (*Raphanus sativus* L.)를 대상 작물로 선정하여 포트실험을 수행하였다 (Fig. 1). 중금속으로 오염된 농경지에서 작물 재배 시 토양으로부터 흡수된 중금속이 지상부로 전이되어 가식부에 축적되어 인간의 건강에 위험요소가 되는데, 열무의 경우 중금속이 유입되는 뿌리와 줄기 모두 가식부이기 때문에 다른 작물에 비해 영향이 클 것이라 판단하여 공시작물로 선정하였다 (Zhuang et al., 2009). 작물 재배는 공시토양을 2 mm 체에 통과시켜 균질화된 토양을 사용하여 $15,000 \text{ a}^{-1}$ 와그너 포트에서 수행되었으며, 모든 처리구는 3 반복으로 진행하였다. 와그너



Fig. 1. The pot experiment in the study.

포트에 토양은 자갈 및 모래를 각 1 kg씩 채워 여과층을 형성시켰으며, 그 위에 공시토양을 2 kg 충전하였다. 이 후 RACR-C를 처리하지 않은 무처리구 (0%)를 대조구로 하여 RACR-C를 토양 무게 대비 1%, 2%, 5%, 10%를 첨가하였으며, 첨가 후에는 균질한 상태가 될 수 있도록 충분히 혼합하였다. 이 때 RACR-C 1%는 19.2 Mg ha^{-1} , 2%, 5% 및 10%는 38.4 Mg ha^{-1} , 96 Mg ha^{-1} , 192 Mg ha^{-1} 에 해당하는 양이다. 열무 재배는 농촌진흥청의 영농기술 재배 방법에 따라 수행하였으며, 시비량은 농촌진흥청의 작물별 비료 사용 처방기준 (NAAS, 2019)에 따라 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 를 7.5-3.0-3.0 $\text{kg } 10\text{a}^{-1}$ 시비하였다. RACR-C는 열무 파종 당일 토양에 혼입하였고, 열무 (*Raphanus sativus* L.)는 2022년 4월 18일에 파종하여 5월 26일까지 40일간 재배 후 수확하였다.

작물의 특성 조사 작물의 생육 특성은 수확 후 처리구당 3주를 임의로 선정하여 수량 (yield), 생중량 (g plant^{-1}), 엽장 (cm), 엽폭 (cm) 및 엽수 (ea)를 조사하였다. 생중량은 토양 표면을 기준으로 지상부와 지하부로 나누고, 절단 후 수분 증발로 인한 무게의 오차를 감소시키기 위해 즉시 측정하였다. 엽장, 엽폭은 상위 3개의 엽을 대상으로 조사하였고, 엽장은 잎의 가장 긴부분, 엽폭은 넓은 부분을 기준으로 길이를 측정하였다.

토양 특성 분석 수확 후 토양 분석은 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법 (NIAS, 2000)에 준하여 분석하였다. 토양 시료는 열무 수확 후 채취한 토양을 풍건 후 2 mm 체를 통과시켜 분석 시료로 사용하였으며, pH와 전기전도도 (EC)는 토양과 증류수를 1:5 (w/v%) 비율로 혼합한 후 30분 동안 진탕하여 각각 pH meter (S220, Mettler Toledo, Switzerland)와 EC meter (S230, Mettler Toledo, Switzerland)를 사용하여 측정하였다. 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법 (UV2550PC, PekinElmer, USA)을 사용하여 분석하였다. T-N은 Kjeldahl법을 사용하였고, 교환성 양이온 (exchangeable cation)은 1 N- NH_4OAc 용액으로 침출 후 용액의 pH를 측정하여 수소이온의 농도를 계산하고 이후 여과하여 ICP-OES (ICPE-9000, Shimadzu, Japan)를 이용하여 K, Ca, Mg, Na의 농도를 분석하였다.

유효태 카드뮴 토양 내 카드뮴의 식물 유효도 평가를 위해 1 M NH_4NO_3 추출법에 준하여 토양 10 g에 1 M NH_4NO_3 20 mL를 취해 2시간 교반 후 No. 6 여과지에 여과하고 여액을 ICP-OES를 이용하여 카드뮴 함량을 측정하였다 (DIN, 1995).

통계처리 본 연구에서는 RACR-C 처리에 의한 중금속 안정화 효율과 토양의 화학적 특성 변화를 평가하기 위하여 SPSS (SPSS version 26, SPSS INC., Chicago, IL, USA)를 이용하여 ANOVA 분산분석과 Duncan's multiple range test를 이용하여 $p < 0.05$ 수준의 유의성 검정을 실시하였다.

Results and Discussion

토양 내 화학적 특성 수확 후 토양의 화학적 특성 변화는 Table 3과 같다. 토양의 pH는 무처리구 (0%)의 경우 5.46이었으며, RACR-C의 처리량이 증가함에 따라 점차 증가하여 10% 처리구에서 6.78까지 증가하였다. Almaroai et al. (2014)의 연구 결과에 따르면 400°C 에서 생산된 oak wood biochar를 5% 수준으로 토양에 처리하였을 때 토양의 pH가 상승되며 이는 처리된 바이오차의 알칼리성 (alkalinity)에 기인한다고 하였는데, 본 연구결과에서도 처리된 바이오차의 높은 pH로 인하여 처리량이 증가함에 따라 pH가 증가한 것으로 판단된다. EC는 pH와 유사하게 무처리

구의 경우 1.45 dS m^{-1} 였으며, 1%, 2%, 5% 및 10% 처리구에서는 각각 1.59, 1.71, 2.59, 2.99 dS m^{-1} 까지 증가하였는데 이는 바이오차에 함유된 다량의 무기염류에 의한 것으로 판단된다 (Lee et al., 2008).

유기물과 총질소 함량은 무처리구와 비교하여 유의한 수준으로 증가하였는데 유기물 함량은 무처리구가 19.8 g kg^{-1} 이였으며 처리량이 증가함에 따라 $27.53 - 41.70 \text{ g kg}^{-1}$ 까지 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 바이오차를 이용한 Park et al. (2021b)의 연구결과에서 바이오차의 사용수준이 증가할수록 토양 유기물 함량이 증가하는 경향을 보인다는 보고와 유사하였다. 총질소 함량은 무처리구가 10.1%로 나타났으며 처리량에 따라 증가하여 10% 처리구에서 16.6%로 높게 나타났는데 이는 고온의 열분해 과정을 통해 응축된 질소화합물이 토양에 다량으로 투입되어 토양 내 총질소 함량이 증가한 것으로 판단된다 (Chan and Xu, 2009).

유효인산 함량은 모든 처리구에서 유의한 수준으로 증가하였는데, 무처리구가 $116.30 \text{ mg kg}^{-1}$ 이였으며 1%, 2%, 5% 및 10% 처리구에서 각각 168, 176, 194, 258 mg kg^{-1} 까지 증가하였다. 바이오차 처리량이 증가할수록 유효인산의 함량이 높아졌으며, 이는 토양 pH에 따른 영향으로 판단된다. 유효인산 함량은 토양의 pH와 높은 상관관계가 있으며, 중성의 pH 범위에서 유효도가 가장 높은 것으로 알려져 있다 (Jin et al., 2002).

토양의 교환성 칼슘, 칼륨, 마그네슘의 함량은 무처리구에서 3.9, 1.6, 2.2 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 이였으며 처리량이 증가함에 따라 증가하여 10% 처리구에서 7.59, 4.18, 6.61 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로 가장 높게 나타났다. Cantrell 등 (Zhang et al., 2021)은 가축분 바이오차가 열분해 (350°C , 700°C)에 의해 무기양분 (Ca, K, Mg 등)이 농축되어 그 함량이 원재료에 비해 증가한다고 하였는데, 본 연구결과에서도 열분해를 통해 농축된 무기양분이 토양에 처리됨에 따라 나타난 결과로 판단된다.

Table 3. Chemical properties soils after harvest of young radish.

Treatment [†]	pH (1:5)	EC (dS m^{-1})	O.M (g kg^{-1})	T-N (g kg^{-1})	Avail. P_2O_5 (mg kg^{-1})	Exch. cations ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)			
						K	Ca	Mg	CEC
0%	5.46 a [‡]	1.45 a	19.58 a	10.1 a	116 a	1.5 a	3.9 a	2.1 a	9.2 a
1%	5.68 a	1.59 b	25.64 b	11.4 b	168 b	2.5 b	4.5 a	3.1 b	13.4 b
RACR-C 2%	6.03 b	1.71 b	27.53 b	11.9 b	176 b	3.6 c	6.1 b	4.8 c	16.4 bc
5%	6.18 b	2.59 c	31.88 c	13.3 c	194 b	3.9 cd	6.9 c	5.7 d	19.0 c
10%	6.78 c	2.99 c	34.70 c	16.6 c	258 c	4.1 d	7.5 d	6.6 e	20.8 c

[†]0%: control, 1%: 1% of the soil weight, 2%: 2% of the soil weigh, 5%: 5% of the soil weight, 10%: 10% of the soil weight.

[‡]Different letter indicates significant different at the 5% level by Duncan's multiple Range Test.

유효태 카드뮴 변화 RACR-C 처리에 따른 카드뮴의 식물유효도는 무처리구에서 7.6 mg kg^{-1} 으로 나타났으며, 바이오차의 처리량이 증가할수록 감소하여 10% 처리구에서 0.13 mg kg^{-1} 으로 가장 낮게 나타났다 (Fig. 2). 10% 처리구에서는 무처리구에 비해 98.2% 감소하였으며 처리 조건에 따라 1% 처리구에서는 4.87 mg kg^{-1} , 2% 처리구에서는 3.73 mg kg^{-1} , 5% 처리구에서는 0.87 mg kg^{-1} 으로 나타났다. 이러한 결과는 RACR-C 처리에 따라 토양의 pH가 높아지면서 토양 내 존재하는 Cd가 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 형태로 침전되어 식물이 사용할 수 없는 형태가 된 것으로 추측되며, 이동성이 감소하여 식물이 흡수하는 카드뮴의 양이 적어진 것으로 판단된다 (Ahmad et al., 2012). 이와 유사하게 Siebers et al. (2014)은 오염 토양에 bone char를 처리한 결과 토양 pH가 증가함에 따라 카드뮴의 식물유효도가 감소한다고 보고하였다. 토양 중 중금속의 식물유효도는 중금속의 종류, 토양 pH, 용존유기탄소, 양이온치환능력, Fe/Mn 산화물

의 함량 등에 의해 변화할 수 있다고 알려져 있다 (Kim et al., 2007). 이 중 토양 pH는 토양 중금속 식물유효도에 가장 중요한 인자로 pH 증가시 토양교질에서 수소이온들이 해리되어 나와서 토양의 음하전은 증대하게 되며, 그 자리에 대부분의 양이온성 중금속 흡착이 증가하게 되어 중금속의 이동성이나 용해도를 감소시킬 수 있다고 보고하였다 (Thomas and Hargrove, 1984; Curtin et al., 1996).

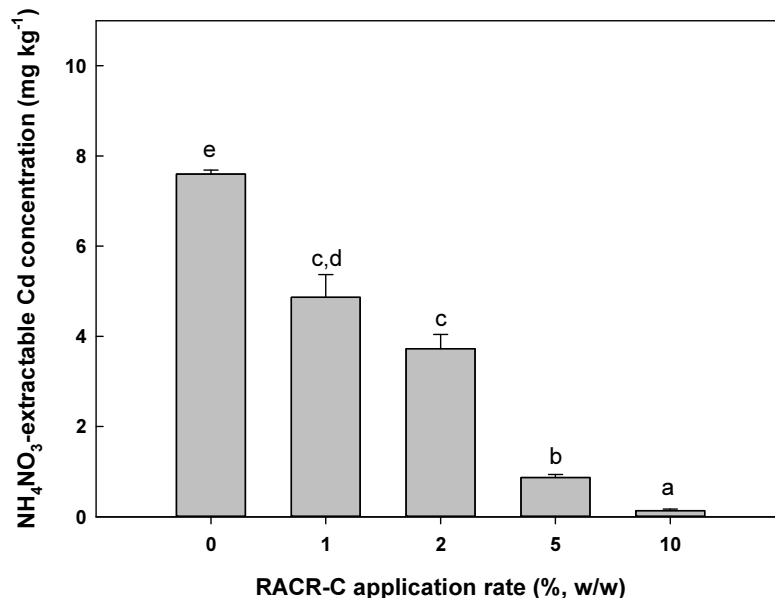


Fig. 2. Phytoavailability of Cd by 1 M NH₄NO₃ extraction in soil after plant harvest. Values are the means \pm SD (n = 3). Values within a bar with different superscripts are significantly different at $p < 0.05$ by Duncan's test.

열무의 수량 및 생육 특성 RACR-C 처리에 따른 열무의 수량 및 생육 특성을 조사한 결과 RACR-C의 처리량은 열무의 생육에 큰 영향을 주었다 (Fig. 3, Table 4). 열무의 수량은 RACR-C 처리량이 증가함에 따라 높게 나타났으며, 10% 처리구에서 445 kg 10a⁻¹로 가장 높게 나타났다. 또한, 열무의 지상부 및 지하부의 길이는 RACR-C 1%, 2%, 5% 및 10% 처리구에서 무처리구에 비해 각각 73.5 - 140.5%, 85.0 - 210.8% 증가한 결과를 보였다. 엽수, 엽폭 또한 이와 유사하게 처리량이 증가함에 따라 각각 3.8 - 9.4 ea plant⁻¹, 2.2 - 5.7 cm plant⁻¹ 범위로 무처리구 대비 31.6 - 147.4% 증가된 것을 확인할 수 있었다. 조사된 모든 생육지표에서 RACR-C를 처리한 처리구가 무처리구에 비해 생육이 증가하였으며, 생체중은 최대 3배 이상의 증수 효과를 보였다. 일반적으로 식물이 성장할 필요 이상의 중금속을 흡수할 경우 피해를 본다고 알려져 있다 (Jung et al., 2006; Hur and Jeong, 2011). 이에 본 연구에서 조사된 열무의 생육 또한 카드뮴의 영향으로 정상적인 생육이 억제되었을 것으로 판단된다. 하지만 RACR-C의 처리량이 증가할수록 무처리구 대비 열무의 생육은 증가하는 경향이 나타났으며, 10% 처리구에서 가장 높은 성장량을 보였다. 이와 같은 결과는 RACR-C에 의한 카드뮴 흡착으로 인해 열무로의 카드뮴 흡수가 제한되어 RACR-C 처리구에서 열무의 생장이 더 활발했던 것으로 판단된다. Lee et al. (2019)의 연구결과에서는 바이오차의 사용에 따라 작물의 생육이 증진된다고 보고한 바 있으며, 이와 유사하게 본 연구에서도 무처리구에 비해 바이오차 처리구에서 생체량, 엽수 등 열무의 생육 증진에 더 효과적이었다. 선행연구 결과 바이오차 처리에 의해 토양의 pH가 증가하여 토양으로의 카드뮴 흡착이 증대되어 부동화되고, 토양 내 유효인산함량이 증가함에 따라 다양한 형태의 인산염광물로 침전되어 열무로의 카

드름 흡수가 저해되었기 때문으로 판단된다 (Lindsay, 1979; Bolan et al., 2003). 많은 연구결과에서 카드뮴은 인산에 의해 토양 내 침전 반응을 통해 카드뮴-인산침전물 (Cd-phosphate precipitates)을 형성하여 용해도가 낮아지며, 토양 내 유효인산 함량이 증가함에 따라 식물이 이용하기 쉬운 형태인 유효태 카드뮴함량이 감소된다고 보고된 바 있다 (Hong et al., 2011; Noh et al., 2015). 다만, 본 연구는 열무 생육 초기의 결과만으로 이루어진 것으로 추후 현장 연구가 필요할 것으로 판단된다.

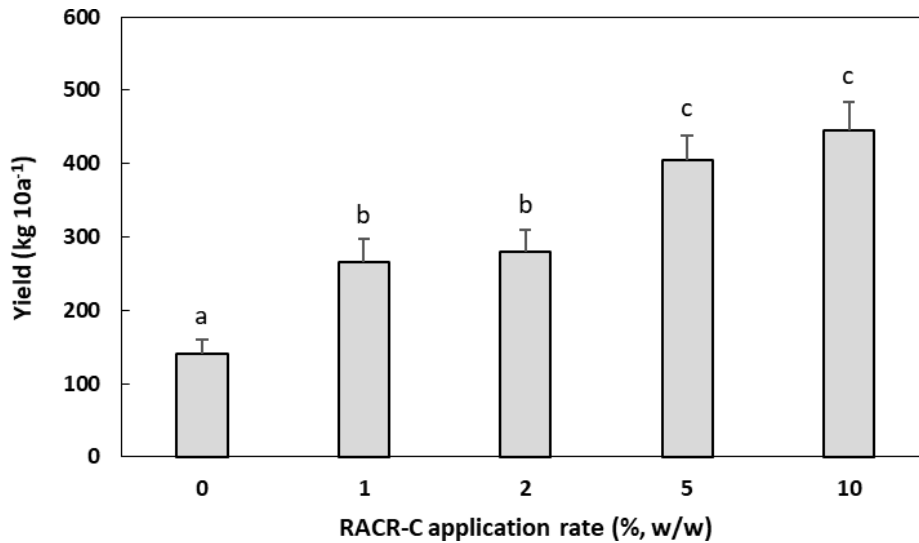


Fig. 3. Yield of young radish under different RACR-C rates applications. Values are the means \pm SD (n = 3). Values within a bar with different superscripts are significantly different at $p < 0.05$ by Duncan's test.

Table 4. Growth characteristics of young radish under different RACR-C rates applications.

Treatment [†]	Root length (cm plant ⁻¹)	Shoot length (cm plant ⁻¹)	Leaf width (cm plant ⁻¹)	Leaf number (ea plant ⁻¹)	Fresh weight (g plant ⁻¹)
0%	5.3 a [‡]	7.6 a	2.2 a	3.8 a	2.8 a
1%	8.1 b	13.2 b	3.2 b	5.0 b	5.3 b
2%	8.2 b	14.9 bc	3.8 b	6.6 c	5.6 b
5%	10.7 c	17.2 cd	5.4 c	8.6 d	8.1 c
10%	11.5 c	18.3 c	5.7 c	9.4 d	8.9 d

[†]0%: control, 1%: 1% of the soil weight, 2%: 2% of the soil weight, 5%: 5% of the soil weight, 10%: 10% of the soil weight.

[‡]Different letter indicates significant different at the 5% level by Duncan's multiple Range Test.

Conclusions

본 연구에서는 랜더링 가축사체 부산물을 이용하여 바이오차를 제조하고 실제 카드뮴오염토양에 처리한 후 작물의 생육 특성과 토양 화학성에 미치는 영향을 평가하였다. RACR-C 처리시 카드뮴오염토양의 pH, 유기물 함량, 유효인산 및 양이온교환능력 등을 증가시키는 토양개량효과가 확인되었다. 또한, 1 M NH₄NO₃ 추출법에 의한 카드뮴의 식물 유효도 분석결과 바이오차 처리량에 따라 무처리구 대비 36 - 98% 수준의 카드뮴 전이 감소 효과가 나타났으며,

생체량, 엽수 등 열무의 생육증진에도 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 랜더링 가축사체 부산물로 제조된 바이오차를 카드뮴 오염토양에 처리시 토양 안정화제로서의 적용이 가능할 것으로 판단되며 폐자원 재활용 측면으로 친환경적이며 경제적으로 효율성이 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was conducted by support of Rural Development Administration (RDA) research and development project (project number: PJ016756).

References

- Ahmad, M., A.U. Rajapaksha, J.E. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Mohan, and Y.S. Ok. 2014a. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere* 99:19-33.
- Ahmad, M., S.S. Lee, J.E. Lim, S.E. Lee, J.S. Cho, D.H. Moon, and Y.S. Ok. 2014b. Speciation and phytoavailability of lead and antimony in a small arms range soil amended with mussel shell, cow bone and biochar: EXAFS spectroscopy and chemical extractions. *Chemosphere* 95:433-441.
- Ahmad, M., S.S. Lee, X. Dou, D. Mohan, J.K. Sung, J.E. Yang, and Y.S. Ok. 2012. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover-and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresour. Technol.* 118:536-544.
- Almaroai, Y.A., A.R. Usman, M. Ahmad, D.H. Moon, J.S. Cho, Y.K. Joo, and Y.S. Ok. 2014. Effects of biochar, cow bone, and eggshell on Pb availability to maize in contaminated soil irrigated with saline water. *Environ. Earth Sci.* 71:1289-1296.
- Almaroai, Y.A., A.R. Usman, M. Ahmad, K.R. Kim, D.H. Moon, S.S. Lee, and Y.S. Ok. 2012. Effects of synthetic chelators and low-molecular-weight organic acids on chromium, copper, and arsenic uptake and translocation in maize (*Zea mays* L.). *Soil Sci.* 177:655-663.
- Baker, A.J.M., R.D. Reeves, and A.S.M. Hajar. 1994. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae). *New Phytol.* 127:61-68.
- Bolan, N.S., D.C. Adriano, P. Duraisamy, A. Mani, and K. Arulmozhiselvan. 2003. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. I. Effect of phosphate addition. *Plant Soil* 250:83-94.
- Cai, Y. and L.Q. Ma. 2003. Metal tolerance, accumulation, and detoxification in plants with emphasis on arsenic in terrestrial plants. *ACS Symp. Ser.* 835:95-114.
- Chan, K.Y. and Z. Xu. 2009. Biochar: Nutrient properties and their enhancement. p. 67-84. In J. Lehmann and S. Joseph (ed.) *Biochar for environmental management: Science and technology*, Earthscan, Clerkenwell, UK.
- Curtin, D., C.A. Campbell, and D. Messer. 1996. Prediction of titratable acidity and soil sensitivity to pH change. *J. Environ. Qual.* 25:1280-1284.
- DIN (German Standards Institute). 1995. Soil quality - Extraction of trace elements from soil using ammonium nitrate solution. DIN 19730. Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- El-Azeem, A., A.M. Samy, M. Ahmad, A.R. Usman, K.R. Kim, S.E. Oh, and Y.S. Ok. 2013. Changes of biochemical properties and heavy metal bioavailability in soil treated with natural liming materials. *Environ. Earth Sci.* 70: 3411-3420.
- Gu, B.W., M.J. Kim, and S.J. Park. 2017. Application of zeolite with different cation exchange capacity for the stabilization of heavy metals in upland soil. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 59:41-49.

- Hong, C.O., S.Y. Kim, and P.J. Kim. 2011. Effect of phosphate fertilizer and manure in reducing cadmium phyto-availability in radish-grown soil. *Korean J. Environ. Agric.* 30(3):261-267.
- Hong, Y.K., J.W. Kim, and S.C. Kim. 2021. Comparing heavy metal pollution in agricultural field located at the industrial complex with calculation of pollution index. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(1):10-19.
- Hur, J.H. and S.W. Jeong. 2011. Effect of water-thoroughly-rinsing in the artificially metal-contaminated soil preparation on final soil metal concentrations. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 33:670-676.
- Jang, H., S. Lee, J. Moon, and C. Park. 2010. Growth of *Syngonium podophyllum* in drainless containers fitted with drainage layers. *Hortic. Sci. Technol.* 28:192-199.
- Jin, H.O., M.J. Lee, Y.O. Sin, J.J. Kim, and S.G. Jeon. 2002. Forest soils. Hyangmunsa, Seoul, Korea.
- John, M.K., C.J. VanLaerhoven, and H.H. Chuah. 1972. Factors affecting plant uptake and phytotoxicity of cadmium added to soils. *Environ. Sci. Technol.* 6:1005-1009.
- Jung, G.B., W.I. Kim, J.S. Lee, J.D. Shin, J.H. Kim, and J.T. Lee. 2006. Availability of heavy metals in soil and their translocation to water dropwort (*Oenanthe javanica* DC.) cultivated near industrial complex. *Korean J. Environ. Agric.* 25:323-330.
- Kang, S.W., J.S. Cho, H.T. Kim, D.C. Seo, and S.D. Moon. 2016. Effect of sesame straw biochar application on soil physics and nitrous oxide emission in upland soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:259-264.
- Khan, S., C. Chao, M. Waqas, H.P.H. Arp, and Y.G. Zhu. 2013. Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil. *Environ. Sci. Technol.* 47:8624-8632.
- Kim, K.R., G. Owens, R. Naidu, and K.H. Kim. 2007. Assessment techniques of heavy metal bioavailability in soil - A critical review. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40:864-871.
- Kim, K.R., J.S. Park, M.S. Kim, N.I. Koo, S.H. Lee, J.S. Lee, and J.G. Kim. 2010. Changes in heavy metal phyto-availability by application of immobilizing agents and soil cover in the upland soil nearby abandoned mining area and subsequent metal uptake by red pepper. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:864-871.
- Kumpiene, J., A. Lagerkvist, and C. Maurice. 2008. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments - A review. *Waste Manage.* 28:215-225.
- Lee, C.H., D.K. Lee, M.A. Ali, and P.J. Kim. 2008. Effects of oyster shell on soil chemical and biological properties and cabbage productivity as a liming materials. *Water Manage.* 28:2702-2708.
- Lee, I.J. 2004. Effect of carbonization temperature on the surface structure and properties of wood charcoal. *Appl. Chem. Eng.* 8:442-445.
- Lee, J.H., D. Luyima, J.Y. Ahn, S.Y. Park, B.S. Choi, T.K. Oh, and C.H. Lee. 2019. Effect of different biochar formulations on the growth of cherry tomatoes. *Korean J. Agric. Sci.* 46:931-939.
- Lehmann, J. 2007. A handful of carbon. *Nature* 447:143-144.
- Li, H., X. Dong, E.B. da Silva, L.M. de Oliveira, Y. Chen, and L.Q. Ma. 2017. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere* 178:466-478.
- Lim, J.E., H.W. Kim, S.H. Jeong, S.S. Lee, J.E. Yang, K.H. Kim, and Y.S. Ok. 2014. Characterization of burcucumber biochar and its potential as an adsorbent for veterinary antibiotics in water. *Appl. Biol. Chem.* 57:65-72.
- Lim, J.E., M. Ahmad, S.S. Lee, C.L. Shope, Y. Hashimoto, K.R. Kim, and Y.S. Kim. 2013. Effects of lime-based waste materials on immobilization and phytoavailability of cadmium and lead in contaminated soil. *Clean: Soil, Air, Water* 41:1235-1241.
- Lindsay, W.L. 1979. Chemical equilibria in soils. pp. 316-326. The Blackburn Press, New Jersey, USA.
- Mohan, D., A. Sarswat, Y.S. Ok, and Jr.C.U. Pittman. 2014. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - A critical review. *Bioresour. Technol.* 160:191-202.

- NAAS. 2019. Fertilization standard of crops. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- NIAST. 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Noh, Y.D., K.R. Kim, W.I. Kim, K.Y. Jung, and C.O. Hong. 2015. Effect of soil chemical properties on phytoavailability of arsenic, cadmium and lead in medicinal plant fields. *J. Agric. Life Sci.* 49(5):267-277.
- Ok, Y.S., A.R. Usman, S.S. Lee, S.A. El-Azeem, B. Choi, Y. Hashimoto, and J.E. Yang. 2011. Effects of rapeseed residue on lead and cadmium availability and uptake by rice plants in heavy metal contaminated paddy soil. *Chemosphere* 85:677-682.
- Ok, Y.S., S.E. Oh, M. Ahmad, S. Hyun, K.R. Kim, D.H. Moon, and J.E. Yang. 2010. Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils. *Environ. Earth Sci.* 61:1301-1308.
- Park, J.H., J.J. Yun, S.W. Kang, S.H. Kim, J.S. Cho, J.J. Wang, and D.C. Seo. 2021a. Removal of potentially toxic metal by biochar derived from rendered solid residue with high content of protein and bone tissue. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 208:d111690.
- Park, J.H., S.W. Kang, J.J. Yun, S.G. Lee, S.H. Kim, J.S. Beak, and J.S. Cho. 2021b. Effects of co-application of biochars and composts on lettuce growth. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(2):151-160.
- Seo, D.C., S.W. Kang, I.W. Choi, H.H. Sung, T.Y. Hur, J.Y. Yoo, and J.S. Cho. 2011. Evaluation of fertilizer value of animal cadavers for agricultural recycling. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:788-793.
- Seo, Y.J., D.C. Se, I.W. Choi, S.W. Kang, S.G. Lee, H.H. Sung, and J.S. Cho. 2012. Degradation rate and velocity under different acidic and alkaline degradation agents for liquid fertilizer of rendering by-product. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:810-816.
- Siebers, N., F. Godlinski, and P. Leinweber. 2014. Bone char as phosphorus fertilizer involved in cadmium immobilization in lettuce, wheat, and potato cropping. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 177:75-83.
- Sun, L., S. Wan, and W. Luo. 2013. Biochars prepared from anaerobic digestion residue, palm bark, and eucalyptus for adsorption of cationic methylene blue dye: Characterization, equilibrium, and kinetic studies. *Bioresour. Technol.* 140:406-413.
- Thomas, G.W. and W.L. Hargrove. 1984. The chemistry of soil acidity. p. 3-56. In F. Adams (ed.) *Soil acidity and liming*. American Society of Agronomy, Madison, USA.
- Uchimiya, M., L.H. Wartelle, I.M. Lima, and K.T. Klasson. 2010. Sorption of deisopropylatrazine on broiler litter biochars. *J. Agric. Food Chem.* 58:12350-12356.
- Zhang, P., X. Zhang, X. Yuan, R. Xie, and L. Han. 2021. Characteristics, adsorption behaviors, Cu (II) adsorption mechanisms by cow manure biochar derived at various pyrolysis temperatures. *Bioresour. Technol.* 331:125013.
- Zhao, X.L. and S. Masaihiko. 2007. Amelioration of cadmium polluted paddy soils by porous hydrated calcium silicate. *Water, Air, Soil Pollut.* 183:309-315.
- Zheng, R.L., C. Cai, J.H. Liang, Q. Huang, Z. Chen, Y.Z. Huang, and G.X. Sun. 2012. The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Chemosphere* 89:856-862.
- Zhuang, P., M.B. McBride, H. Xia, N. Li, and Z. Li. 2009. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. *Sci. Total Environ.* 407(5):1551-1561.